

In-situ 진공계이지 교정장치 개발

홍승수^{1*} · 임인태¹ · 조문재² · 정원호³

¹한국표준과학연구원 진공기술센터, 대전 305-600

²한국표준과학연구원 산업지원팀, 대전 305-600

³(주) 브이티에스, 대전 306-802

(2006년 8월 23일 받음)

정적법(constant volume method)을 이용하여 1 Pa~100 kPa 영역에서 진공계이지의 직접교정(direct calibration) 장치를 개발하였다. 이 장치는 피 교정 계이지의 이동 없이 in-situ 상태에서 비교교정(comparison calibration)도 가능하다. 이 장치가 개발됨으로서 산업체 교정기관의 생산성을 높이고 개발도상국에 국가 진공 표준과 교정기술을 보급할 수 있게 되었다.

주제어 : 정적법, 진공표준, 절대교정, 교정, 진공계이지

I. 서 론

정적법 진공표준기는 용기 내 온도가 일정한 상태에서 기체를 팽창시키면 용기의 부피와 기체 압력의 곱이 일정하다는 보일의 법칙(Boyle's law)을 이용한다. 이 원리는 표준기에서 기준압력(reference pressure)의 발생이 다른 방법에 비해 비교적 간단하고 제작이 쉽고 자동화가 용이할 뿐 아니라 기술이 잘 알려져 있으므로 많은 나라의 표준기관에서 진공표준기로 활용되고 있다 [1~5]. 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)에서도 이미 정적법 표준기를 개발하여 용량형격막식계이지(capacitance diaphragm gauge, CDG) [6]나 공진형실리콘계이지(resonance silicon gauge, RSG) 등 기준기(reference gauge)에 대한 교정(calibration) 서비스를 해오고 있다.

반도체, 디스플레이, 박막제조 등 첨단산업 진공공정에서의 정확한 압력측정에는 CDG나 피라니계이지(pi-rani gauge)가 많이 사용되고 있다. 이 계이지들은 국가 표준기관인 KRISS에서 교정된 기준기를 이용하여 자체교정 하는 방법으로 진공표준의 소급성(traceability)을 유지해 오고 있다. 그러나 사용자가 기준기를 교정받기 위해서는 장치를 멈추고 계이지를 분리해야 하므로 적어도 3주 이상은 계이지를 사용할 수 없는 불편함을 감수하고 있는 실정이다. 따라서 산업체 교정 생산성 및 진공표준의 효율적인 소급성 유지를 위하여 KRISS에서 수행하고 있는 “산업측정신뢰도 제고사업”

으로 “산업체 보급형 in-situ형 진공계이지 직접 및 비교 교정장치 개발” 사업을 수행하였다. 그 결과 직접교정과 교정된 계이지를 이용하여 하급계이지를 교정할 수 있는 장치를 개발하게 되었다.

이 장치는 부피가 서로 다른 진공용기에 기체를 순차적으로 확장시켜 교정용기의 압력을 계산하는 정적법을 이용한 직접교정과 교정된 기준계이지를 이용하여 계이지 이동이 없이 in-situ 상태에서 오리피스 기체흐름 제어 방법에 따라 1 Pa~100 kPa 구간에서 진공계이지의 비교교정이 가능하도록 하나의 장치로 구성된 것이 특징이다. 이 기술은 이미 한국, 미국, 일본에 특허를 출원하였으며 이 장치가 본격적으로 보급되면 비교교정 장치의 수입대체는 물론 개발도상국의 표준기관에 KRISS 진공표준 보급도 가능하게 되므로 많은 기술적 파급효과가 있을 것으로 판단된다.

II. 실험장치 및 방법

그림 1의 장치는 한 개의 기체저장고와 로터리펌프, 각각 부피가 다른 세 개의 진공용기(A, B, C)와 이를 배기하기 위한 스크롤펌프와 터보분자펌프로 구성되어 있다. 용기 (A)의 초기압력 측정에는 DPI 515 압력계가 사용되었다. 용기 (B)에는 13 kPa 용량의 CDG, 용기 (C)에는 133 Pa과 133 kPa 용량의 CDG가 부착되어서 부피를 측정에 사용되었다. DPI 515 압력계와 CDG들은 본 장치에 부착하기 전에 저진공 국가표준기인 초음

* [전자우편] sshong@kribs.re.kr

파간섭수온주압력계(ultrasonic interferometer manometer)에서 사전에 교정하였다 [7, 8]. 용기 (C)에 부착된 고진공용 게이지는 도달진공도 측정에 사용되었으며, 온도보상을 위하여 각 진공용기에는 분해능이 0.01°C 인 온도계가 부착되어 있다.

그림 1 장치의 진공용기, 진공펌프, 각종 게이지들은 용도와 성능이 조금씩 다른데 그림에 표시된 약호들은 각각 GV(gate valve), FV(foreline valve), RV(roughing valve), PV(pneumatic valve), MV(manual valve), PG(pirani gauge), RTD(resistance temperature device) 등을 의미한다. 기체저장고는 교정용 기체의 고순도를 유지하기 위하여 스테인레스 스틸로 제작하였으며 기체를 채우기 전에 진공펌프로 배기하고 굽기(bake-out)를 충분하게 하여 기체에 수분이나 오염 물질이 섞이지 않도록 하였다.

진공용기 사이에 있는 밸브들은 개폐에 따른 부피변화가 작은 공기압 다이아프램 밸브(swagelok 회사)를 사용하였다. 이 장치의 특성상 실험 중에 부피가 변하면 이 부피변화가 직접 불확도 요인이 되므로 용기 사이의 배관, 용기와 펌프의 배관, 밸브 및 계측기 부착 등 모든 배관에 가능하면 신축성이 있는 주름관(bellows)을 사용하지 않고 스테인레스 스틸 관으로 직접 배관하여 내부압력 변화에 따른 부피변화 오차가 없도록 하였다. 또한 용기의 내부 표면은 기체 방출량(outgassing rate)을 줄이기 위하여 전해연마하여 표면적을 최소화 하였

다. 비교정 게이지가 부착되는 용기 (C)의 중앙에는 지름이 10 mm인 오리피스(orifice)가 있는 판이 있어서 앞으로 교정영역을 고진공까지 확장하여 고진공게이지를 비교교정 할 때 기체흐름을 안정화시켜 교정이 쉽도록 설계되었다.

모든 밸브들은 공기압력 6 kg/cm^2 에서 구동되었으며 장비 입구에 레귤레이터를 설치해서 설정압력이 항상 일정하게 유지되도록 하였다. 만약 사용도중에 갑작스러운 공기압 변화로 인한 오동작으로부터 장치를 보호하도록 안전장치가 마련되어 있다. 장치의 보호를 위해서 일부 밸브에 연동장치(interlock)를 구성하여 한 곳이라도 연동장치가 작동하고 있을 경우에는 밸브가 구동하지 않도록 설계하였다. 장치의 이해를 돋기 위해 연동장치의 내용을 요약하여 설명하면 다음과 같다.

- 1) 스크롤펌프(scroll pump)가 off되어 있을 때 : RV2, RV3, RV4, FV1가 열리지 않는다.
- 2) 로터리펌프(rotary pump)가 off되어 있을 때 : RV1이 열리지 않는다.
- 3) RV2, RV3, RV4중 하나의 밸브라도 열려 있는 경우 : FV1이 열리지 않는다.
- 4) FV1이 열려 있는 경우 : RV2, RV3, RV4가 열리지 않는다.
- 5) FV1이 열려 있지 않은 경우 : GV1, GV2, GV3밸브가 열리지 않는다.
- 6) GV1, GV2, GV3이 하나라도 열려 있는 경우 :

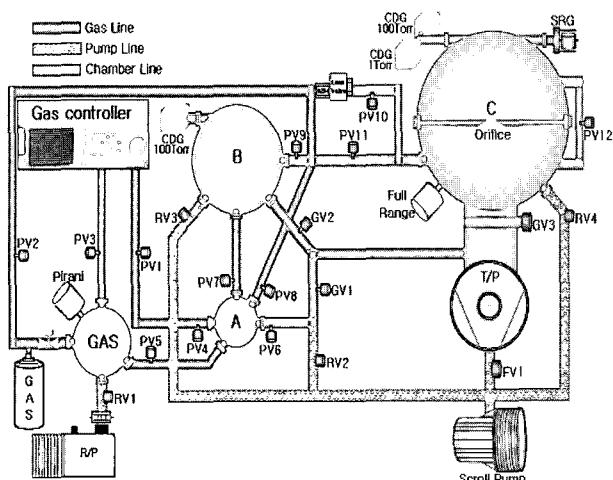


그림 1. 정직법을 이용하여 산업체 보급용으로 개발된 교정범위 1 Pa ~ 100 kPa인 진공 게이지 직접 및 비교교정 장치 개략도.

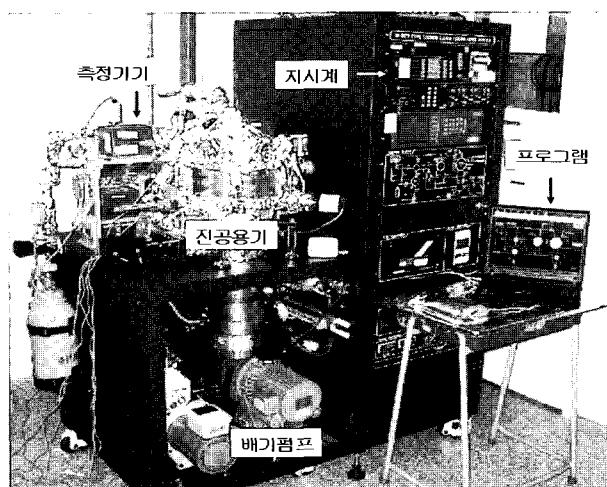


그림 2. In-situ형 진공게이지 교정장치 사진. 주요부분은 진공용기, 배기펌프, 측정기기, 지시계, 자동화 프로그램 등으로 구성되어 있다.

- FV1이 닫히지 않는다.
- 7) PV5가 열려있는 경우 : RV1이 열리지 않는다.
 - 8) RV1이 열려 있는 경우 : RV5가 열리지 않는다.

그림 2는 제작된 장치의 사진으로 크게 진공용기, 배기장치, 측정기기, 지시계 및 프로그램으로 구성되어 있으며, 현재는 반자동으로 장치가 운용되고 있으나 앞으로는 측정을 완전히 자동화할 수 있도록 모든 하드웨어를 구성시켜 놓았다.

III. 실험결과 및 토의

3.1 부피율 측정

그림 1과 같이 구성된 정적법표준기에서 비교정 계이지를 용기 (C)에 부착하고 교정하기 위해서는 용기 (A)의 초기압력과 각 용기들 사이의 부피율을 알아야 기준압력을 계산할 수 있으므로 용기 (A)와 용기 (A+B+C)의 부피율 X_1 과 용기 (A)와 용기 (A+B)의 부피율 X_2 를 각각 다른 방법으로 실험하여 아래 식 (2)와 식 (3)을 이용해서 계산 할 수 있다 [7, 8].

$$X_1 = A/(A+B+C) = [1 - (PY_{12}/PY_{11})^{1/n}] \times (PY_{21}/PY_{22}) \quad (2)$$

$$X_2 = A/(A+B) = P_{X22}/P_{X21} \quad (3)$$

여기에서 식 (2)의 n 은 반복 측정수이고 식 (3)의

표 1. 용기의 부피율 (A)/(A+B+C) 즉 X_1 과 (A)/(A+B) 즉 X_2 를 반복 측정하여 정리한 결과.

| 측정 수 | X_1 | X_2 |
|------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 7.6034×10^{-3} | 5.1827×10^{-2} |
| 2 | 7.6073×10^{-3} | 5.1821×10^{-2} |
| 3 | 7.6102×10^{-3} | 5.1821×10^{-2} |
| 4 | - | 5.1831×10^{-2} |
| 5 | - | 5.1829×10^{-2} |
| 6 | - | 5.1828×10^{-2} |
| 평균 | 7.6070×10^{-3} | 5.1824×10^{-2} |
| 표준편차 | 3.450×10^{-6} | 4.250×10^{-6} |

P_{X21} 은 용기 (A)에 채워진 기체의 초기압력을 DPI 515 압력계로 읽은 값이고 P_{X22} 는 용기 (A)의 기체를 용기 (B)에 팽창시켜 압력이 안정화 되었을 때 용기 (B)에 부착된 CDG로 읽은 압력이다. P_{Y11} 은 기체저장고에 채워진 용기 (A)에 채운 용기 (B)와 (C)에 팽창시킨 뒤 읽은 용기 (B+C)의 최초 압력이다. 압력 P_{Y11} 측정이 끝난 뒤 용기 (A)의 기체만 기체저장고를 통해서 뽑아낸다. 용기 (A)의 기체가 충분하게 배기되어 압력이 10^{-3} Pa 이하가 된 것을 확인하고 기체저장고와 분리한 뒤 용기 (B+C) 기체를 (A)에 팽창시킨다. 일정 시간이 지나서 기체압력이 안정되었다고 판단되면 용기 (A)의 기체를 기체저장고를 통해서 뽑아낸다. 이렇게 (A)의 기체를 뽑아낸 수가 식 (3)의 측정 수 n 이 되며 P_{Y12} 는 이런 반복 과정을 거쳐서 읽은 용기 (B+C)의 마지막 압력이다. 실제 실험에서는 용기 (A)에 기체를 채우기 전에 용기 (D)에 기체를 미리 채워 온도평형을 위해 적어도 10분 이상 기다려야 한다. 이에 대한 측정방법은 참고문헌 [9, 10]에 자세하게 설명되어 있다. 표 1은 위와 같은 방법으로 측정하여 계산한 용기의 부피율 X_1 과 X_2 를 정리한 것으로 이 부피율의 평균값은 각각 7.607×10^{-3} 과 5.1824×10^{-2} 이었으며 3회와 6회 반복측정 값의 표준편차는 3.450×10^{-6} 과 4.250×10^{-6} 이었다. 그림 3은 부피율 X_2 의 반복 측정결과에 대한 그래프로 수평축은 측정수이고 수직축은 부피율 값이다.

3.2 CDG 예비 교정

그림 1의 장치에서 교정용기 (C)에 발생되는 기체압력

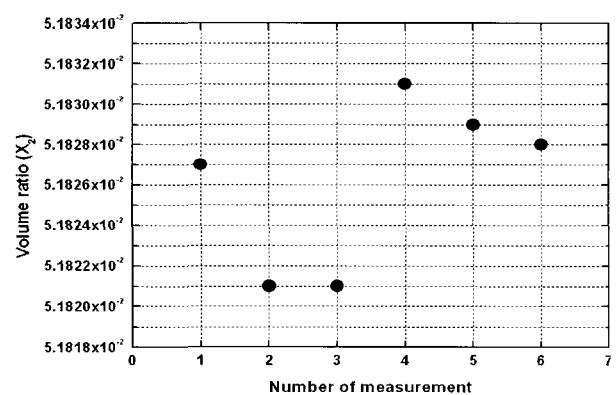


그림 3. 6회 반복 측정한 용기 부피율 (A+B)/(A)인 X_2 측정 결과. 평균값은 19.295이고 반복 측정값의 표준편차는 0.00215이다.

을 계산하기 위해서는 식 (5)와 같이 용기 (A)에 가해진 초기압력과 식 (4)에 설명된 기체의 팽창방법(expansion mode, EM)을 알아야 한다. EM은 교정할 때 용기 (A)에 채운 기체를 (B)에 팽창시킨 뒤 용기 (B)의 기체를 몇 번 반복해서 배기 했느냐에 따라 결정된다. 본 실험에서는 표 2에 보인 EM값처럼 기준압력 26.7 Pa를 기준으로 용기 (B)의 배기수를 다르게 적용하였다. 용기 (B)의 배기 횟수에 따른 EM값은 아래 식 (4)와 같이 결정할 수 있으며 N은 교정압력을 만들 때 용기 (B)의 기체를 펌프를 통해 배출시킨 횟수가 된다 [8-10].

$$EM_1 = X_1, EM_2 = X_2 \times X_1, EM_3 = X_{22} \times X_1, \quad (4)$$

$$EM_4 = X_{23} \times X_1 \dots EM_N = X_2^{N-1} \times X_1$$

위와 같은 절차와 방법에 따라 용기 (C)에 발생된 기준압력 P_s 는 아래 식(5)에 의해 계산된다.

$$P_s = P_i \times EM_N \times (T_a / T_c) \quad (5)$$

여기에서 P_i 는 DPI 515 압력계로 측정한 용기 (A)의 초기압력이고 T_a 와 T_c 는 각각 용기 (A)와 (B)의 절대온도이다.

그림 1의 장치에서 실제로 CDG를 교정하는 방법을 요약해서 설명하면 아래와 같으며, 그림 4는 사용자의 이해를 돋기 위해서 교정방법을 자세하게 설명하기 위해서 그린 개략도이다.

- 1) 용기 (A)에 원하는 질소 가스를 주입한다. 그림 4 (a).
- 2) 밸브 PV7번을 열어 용기 (A)에서 용기 (B)로 가스를 확장 시킨다. 이때 (B)에 부착된 CDG의 압력이 안정화 될 때까지 약 2분 정도 기다린다, 그림 4 (b).
- 3) 밸브 PV7번을 닫고 용기 (B)의 가스를 배기 한다. 이때 CDG가 초기압력 즉 영점에 도달 할 때까지 약 10분 동안 배기 한다, 그림 4 (c).
- 4) 밸브 PV7, PV9, PV11을 차례로 열어서 용기 (A)에서 (B+C)로 가스가 확장되도록 한다. 이 때에도 용기 (B)와 (C)에 부착된 CDG를 이용하여 안정화를 확인한다. 이 경우 보통 압력이 안정화 될 때까지는 약 5분 정도 기다려야 한다, 그림 4 (d).
- 5) 용기 (C)에 부착된 피교정용 CDG의 압력을 읽어 기록한다.
- 6) 용기 (A), (B), (C) 사이에 있는 밸브를 모두 열고 용기내의 잔류 가스를 배기한다.
- 7) 1회 측정이 끝나면 원하는 다른 기준압력을 만들기 위해 용기 (A)에 가스를 채우고 측정을 2)부터 반복한다.

표 2는 위와 같은 방법으로 133 Pa 용량의 CDG를 교정한 결과로서 여기에서 압력비는(CDG 지시압력)/(기준압력), 즉 Pr/P_s 이다. 실제로 교정은 3회 반복하였으나 여기에서는 1회 교정결과만을 표로 제시하였다. 그림 5는 표 2의 교정결과를 수평축을 기준압력(reference pressure)으로 수직축을 압력비(pressure ratio)로 놓

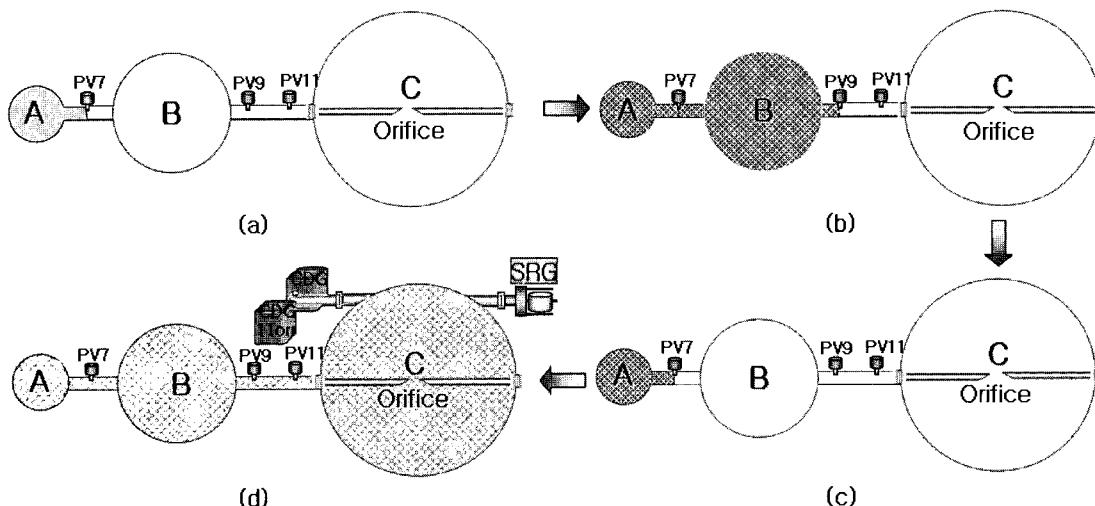


그림 4. CDG 교정하는 방법을 설명하기 위해 그린 교정절차의 설명 개략도.

표 2. 133 Pa 용량의 CDG 교정 결과. 용기 (C)의 기준압력은 용기 (A)의 초기압력과 부피율 X_1 과 X_2 및 expansion mode (EM) 값에 의해 결정된다.

| 초기압력 Pi(kPa) | 기준압력 Ps(Pa) | 지시압력 Pr(Pa) | 압력비 (Pr/Ps) | EM _값 | 용기 A 온도(K) | 용기 C 온도(K) |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 0,6053 | 0,2388 | 0,2354 | 0,9859 | EM ₂ | 294,64 | 294,41 |
| 0,6719 | 0,2651 | 0,2587 | 0,9756 | EM ₂ | 294,70 | 294,44 |
| 1,5385 | 0,6071 | 0,6051 | 0,9968 | EM ₂ | 294,73 | 294,48 |
| 2,6064 | 1,0285 | 1,0308 | 1,0022 | EM ₂ | 294,83 | 294,55 |
| 3,2730 | 1,2914 | 1,2886 | 0,9979 | EM ₂ | 294,85 | 294,62 |
| 3,5530 | 1,4020 | 1,4057 | 1,0027 | EM ₂ | 294,99 | 294,73 |
| 7,0100 | 2,7660 | 2,7835 | 1,0063 | EM ₂ | 295,01 | 294,76 |
| 13,7253 | 5,4161 | 5,4496 | 1,0062 | EM ₂ | 295,06 | 294,79 |
| 23,7270 | 9,3638 | 9,4228 | 1,0063 | EM ₂ | 295,10 | 294,80 |
| 30,6236 | 12,0851 | 12,1612 | 1,0063 | EM ₂ | 295,10 | 294,81 |
| 33,9553 | 13,3999 | 13,4851 | 1,0064 | EM ₂ | 295,10 | 294,81 |
| 67,6746 | 26,7067 | 26,8600 | 1,0057 | EM ₂ | 295,10 | 294,81 |
| 7,2326 | 55,0708 | 55,5878 | 1,0094 | EM ₁ | 295,10 | 294,82 |
| 12,3828 | 94,2788 | 95,2371 | 1,0102 | EM ₁ | 295,08 | 294,82 |
| 15,9984 | 121,8073 | 123,0837 | 1,0105 | EM ₁ | 295,08 | 294,82 |
| 17,5836 | 133,8763 | 135,3091 | 1,0107 | EM ₁ | 295,06 | 294,80 |

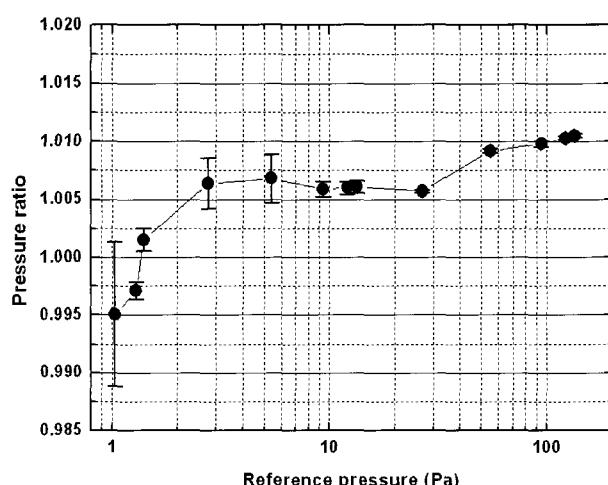


그림 5. CDG를 교정결과를 그린 수평축의 기준압력에 대한 수직축의 압력비(계이지 지시압력/기준압력) 그래프. 기준압력 1.3 Pa 이하에서는 압력비가 작았으며 55 Pa 이상에서는 압력비가 크게 나타났다.

고 그린 것이다. 그 결과 1.3 Pa 이하의 낮은 압력에서 반복측정의 분산이 크고 압력비도 낮게 나타났는데

이 주요한 이유는 낮은 초기압력에서 DPI 515 압력계의 분해능과 정확도가 충분하게 좋지 않기 때문인 것으로 추측된다. 이와 반대로 기준압력 55 Pa 이상에서는 압력비가 상대적으로 높게 나타났는데 이 이유는 표 2에 보인 것처럼 expansion mode(EM)가 다른 압력에서와 다르기 때문일 것으로 추측된다.

IV. 결 론

정적법 진공표준기와 진공계이지 비교교정기가 하나의 장치로 구성된 in-situ형 산업체 보급형 진공계이지 직접 및 비교교정 장치를 개발하였다. 이 장치는 기존의 KRISS 정적법 표준기보다 외형이 3배 이상 작고 실험 중 전원 차단이나 오동작으로부터 장치를 보호하기 위하여 내부에 interlock 기능을 가지고 있으며, 장치 운용이나 교정에 완전 자동화가 가능하게 설계되어 교정효율을 극대화 할 수 있었다.

이 장치의 부피율을 측정한 결과 용기 (A)/(A+B+C) 부피율은 7.607×10^{-3} 이었고 용기 (A)/(A+B)의 부피

율은 5.1824×10^{-2} 이었으며, 장치의 성능평가를 위해 서 133 Pa 용량의 CDG를 교정하였다. 그 결과 기준압력 0.238 Pa에서 133.87 Pa까지의 압력비가 0.9859부터 1.0107 사이로 기준압력 1.3 Pa 이하에서는 압력비가 낮았고 55 Pa 이상에서는 압력비가 높은 것을 알 수 있었다. 여기에서 낮은 압력에서 압력비가 낮은 것은 초기압력 측정에 사용된 DPI 515 콘트롤러의 분해능이 충분하지 않기 때문이고 높은 압력에서 압력비가 높은 것은 expansion mode가 다르기 때문인 것으로 추측된다. 따라서 이 장치의 성능을 향상하기 위해서는 용기 자체의 부피율을 바꾸거나 낮은 압력에서 초기압력 측정의 정확도를 높여야 하며 특히 expansion mode 차이에 의한 기준압력 발생 오차를 줄여야 할 것으로 판단되므로 이를 개선하기 위한 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

이 장치가 KRISS 독자 기술로 개발됨으로서 앞으로 비교교정 장치의 수입대체는 물론 진공계이지 직접 및 비교교정 장치를 개발도상국의 표준기관에 보급도 가능하므로 국가 진공표준 및 교정기술을 수출할 수 있게 된 것에 큰 의미가 있다고 판단된다.

참고문헌

- [1] M. Hirata, J. of Vac. Soc. Japan **32**, 174 (1989).
- [2] M. Hirata, J. of Vac. Soc. Japan **38**, 174 (1995).
- [3] Peer review information document vacuum, NMIJ/AIST Japan, 1 (2003).
- [4] M. Bergoglio, A. Calcatelli, Metrologia **41**, 278 (2004).
- [5] J. C. Greenwood, Vacuum **80**, 548 (2006).
- [6] 배석희, 인상열, 정광화, 이영백, 신용현, 진공공학, (한국경제신문, 2000) p. 287.
- [7] 홍승수, 신용현, 정광화, 한국진공학회지 **5**, 181 (1996).
- [8] 홍승수, 신용현, 정광화, 한국진공학회지 **10**, 173 (2001).
- [9] 홍승수, 임인태, 신용현, 정광화, 한국진공학회지 **14**, 59 (2005).
- [10] 홍승수, 임인태, 신용현, 정광화, 한국진공학회지 **14**, 104 (2005).

Development of an Apparatus for In-situ Vacuum Gauge Calibration

S. S. Hong^{1*}, I. T. Lim¹, M. J. Jho², and W. H. Chung³

¹Vacuum Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600

²Industrial Consulting Team, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600

³VTS Corporation, Daejeon 306-802

(Received August 23, 2006)

We have developed in-situ vacuum gauge calibration system in the range 1 Pa to 100 kPa by using constant volume method. The system is capable of gauge calibration by comparison method without demount the reference gauges. The system will be useful for dissemination of national vacuum standards to foreign developing countries and domestic industries.

Keywords : Constant volume method, Vacuum standards, Calibration, Vacuum gauge

* [E-mail] sshong@kriis.re.kr